017/A - Débit dans les fouilles

Méthode de Cazenove

Il s'agit d'estimer le débit dans une fouille protégée par un écran latéral étanche fermé sur un horizon relativement imperméable.

Cette situation particulière a été traitée par Etienne de Cazenove qui a rassemblé l'ensemble des méthodes nécessaires. Ce qui suit est une adaptation dans la présentation des résultats de Cazenove.

La méthode est applicable lorsque le débit pompé est assez faible pour que le niveau à l'extérieur de l'enceinte ne soit pas sensiblement affecté par le pompage et puisse être considéré comme constant. En pratique, cela correspond au cas des batardeaux en eau, où l'épuisement du batardeau ne fait pas varier le niveau de la rivière. C'est également le cas des fouilles dans des formations perméables (alluvions du Rhône, alluvions anciennes de Paris) fermées par des enceintes en paroi moulée ancrées dans des formations réputées semi-imperméables (argile, craie, molasses).

Un rapport minimum de perméabilité de 20 pour la couche réservoir à 1 pour la couche bouchon constitue la limite de validité d'utilisation de cette méthode.

1 CARACTERISATION DU PROBLEME

Les données significatives sont rassemblées sur une impression du logiciel Cazenove, où l'on retrouve les 3 couches significatives.

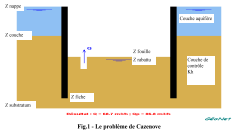


Fig.1 - Le problème de Cazenove

Pour caractériser la perméabilité, on utilise la valeur

$$Km = \sqrt{Kh.Kv}$$

Si la fiche de l'enceinte est rentrée dans le substratum, il n'y a pas de calcul possible,

Sur la première (couche aquifère), la seule donnée nécessaire est le niveau de nappe à l'extérieur de la fouille, $\mathbf{Z_{nappe}}$. Cette couche peut être un réservoir, sans modification du principe de calcul.

La seconde représente la couche semi-imperméable qui contrôle le débit dans la fouille Les paramètres nécessaires sont ici,

1. $\mathbf{Z_{couche}}$, la cote du toit de la couche
2. **Kh**, sa perméabilité horizontale
3. et $\mathbf{A_k} = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$, l'anisotropie de perméabilité de la couche

Le substratum, considéré comme étanche, est caractérisé par la cote de son toit, $Z_{substratum}$ .Il n'y pas d'inconvénient à placer ce toit à une profondeur importante.

La géométrie du projet est définie de son côté par 8 paramètres,

1. **S**, la surface de la fouille
2. **p**, son périmètre
3. **D**, sa petite dimension
4. $\mathbf{Z_{rabattu}}$, le niveau retenu pour la nappe intérieure
5. $\mathbf{Z_{fouille}}$, le niveau de fouille
6. $\mathbf{Z_{puits}}$, le niveau de la base des puits (Z_{puits}=$Z_{fouille}$ dans le cas d'un pompage en fond de fouille)
7. $\mathbf{Z_{fiche}}$, la cote de fiche de l'enceinte
8. **e**, l'épaisseur de l'enceinte

$$Zfiche < Zsubstratum \Leftrightarrow q = 0$$

2 PRINCIPE DE LA METHODE

Le débit unitaire, **q**, est calculé pour un mètre d'enceinte, et le débit total, **Q** est

$$\mathbf{Q = q.p}$$

L'écoulement est découpé en fragments pour lesquels la formulation analytique de la perte de charge est connue.

La perte de charge totale **s**, entre le niveau statique de la nappe à l'extérieur de l'écran et le niveau rabattu à l'intérieur de la fouille est la somme des pertes de charge dans les différents fragments,

$$\mathbf{s = s_{11} + s_{12} + ...}$$

Sur la base du modèle de Darcy, chacun de ces termes est proportionnel au débit **q**, par une relation du type $s_{ij} = a_{ij}.q$, si bien qu'il est possible de calculer q comme,

$$q = \frac{s}{\sum\left(a_{ij}\right)}$$

Le nombre de fragments et la valeur des coefficients sont fonction de la géométrie du problème.

3 FRONTIERES ET FRAGMENTS

Le sommet du bouchon, à la cote $\mathbf{Z_{bouchon}}$, constitue toujours une frontière. Au dessus de cette frontière, aucune perte de charge n'est prise en compte. Sauf exception, cette frontière est placée à la plus basse des quatre cotes, nappe intérieure, fond de fouille, toit de la couche de contrôle, base des puits.

Ces niveaux ne peuvent pas être dans une position quelconque les uns par rapport aux autres, ni par rapport à la fiche de l'enceinte. Les anomalies sont les suivantes :

1. aucun des niveaux ne peut être inférieur à la fiche de l'enceinte (cette situation correspond à un rabattement en champ libre qui est hors des limites de la méthode).
2. le niveau rabattu ne devrait pas être inférieur à la base des puits.
3. si la base des puits est placée au dessus du toit de la couche de contrôle, c'est cette dernière qui constitue la frontière.

L'épaisseur de la couche filtrante intérieure, **m'** et la fiche intérieure **f'** sont calculées à partir de la cote de bouchon par

$$m' = Z_{bouchon} - Z_{substratum}$$
$$f' = Z_{bouchon} - Z_{fiche}$$

ce qui détermine le coefficient de forme de l'écoulement intérieur

$$cf = \frac{D}{m'.A_k}$$

qui permet de caractériser la forme des lignes de courant par une valeur numérique.

A l'extérieur, on définit de la même manière l'épaisseur de la couche filtrante et la fiche,

$$m = Z_{couche} - Z_{substratum}$$
$$f = Z_{couche} - Z_{fiche}$$

Le découpage en fragments et la formulation des $\mathbf{a_{ij}}$ varient suivant la forme des écoulements intérieurs et extérieurs.

3.1 La fouille est étroite (cf < 0,33)

Les lignes de courant dans le bouchon seront parallèles. Si bien que le niveau piézométrique sur le plan horizontal qui passe par la fiche de l'enceinte sera partout identique. L'écoulement est alors divisé en deux fragments qui se raccordent au niveau de ce plan horizontal.

1. a_{11} caractérise globalement l'écoulement extérieur jusqu'au plan de base de l'enceinte. Sa formulation est fonction du taux de pincement des lignes de courant sous l'enceinte, qui est défini par un coefficient de pincement,

   $$cp = \frac{f.Ak}{D}$$

   Le coefficient a_{11} a une valeur explicite dans les cas limites. Pour les valeurs importantes du coefficient de pincement,

   $$a_{11}.Km = \frac{\ln\left(24.\pi.cp\right)}{\pi}$$

   alors que pour les faibles valeurs du coefficient de pincement,

   $$a_{11}.Km = \frac{2.\pi}{\ln\frac{12.\pi}{cp}}$$

   La figure 2 donne l'interpolation entre les valeurs extrêmes.

Ce document vise à un but d'information. Ses auteurs et Terrasol déclinent toute responsabilité quant à l'utilisation, adaptation ou interprétation de cette information dans le cadre d'une activité professionnelle.

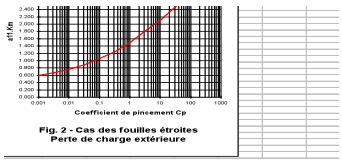


Fig. 2 - Cas des fouilles étroites
Perte de charge extérieure

Le coefficient de perte de charge, a_{11}, est établi pour les écrans parallèles, cas des fouilles rectangulaires de longueur importante par rapport à leur largeur.
Pour tenir compte du pincement des lignes de courant dans le plan horizontal, il sera divisé par $\sqrt{\frac{2.S}{p.D}}$

2. le coefficient a_{12} caractérise la perte de charge entre le plan qui passe par la fiche de l'enceinte et le fond de fouille (perte de charge dans le bouchon),

$$a_{12} = \frac{p.f'}{Kv.S}$$

soit, avec les coefficients retenus

$$a_{12} = \frac{p.f'.Ak}{Km.S}$$

3.2 La fouille est large si cf > 3

Dans ce cas, l'écoulement est représenté par trois fragments, partagés par les faces verticales qui prolongent l'enceinte.

1. sous l'enceinte, la valeur du coefficient a_{22} est immédiate,

$$a_{22} = \frac{e}{Kh.(m-f)}.$$

2. la valeur de a_{21} (écoulement extérieur) et de a_{23} (écoulement intérieur) est fonction du taux de fermeture de l'aquifère du côté considéré.

Taux de fermeture	Côté intérieur	Côté extérieur
	$tf' = f'/m'$	$tf = f/m$

Le coefficient a_{21} (respectivement a_{23}) a une valeur explicite dans les cas limites. Pour les valeurs importantes de taux de fermeture tf (respectivement tf'),

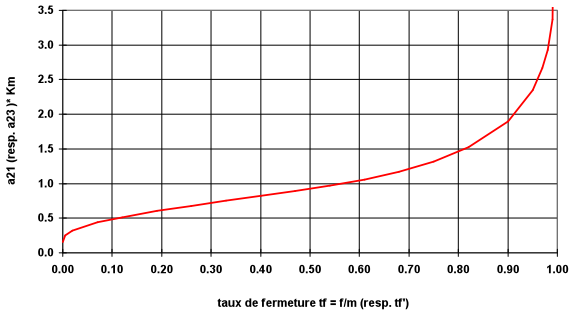
$$a_{21}.Km = \frac{2.\ln\left(\frac{2}{1-tf}\right)}{\pi}$$

alors que pour les faibles valeurs du coefficient,

$$a_{21}.Km = \frac{\pi}{2.\ln\frac{8}{\pi.tf}}$$

La figure 3 donne l'interpolation entre les valeurs extrêmes. Elle permet d'obtenir le coefficient de perte de charge de chaque côté de l'enceinte à partir des taux de fermeture respectifs.

Fig.3 - Fouilles larges, perte de charge extérieure (resp. intérieure)



3.3 Les fouilles intermédiaires (0,33< cf <3)

Il est nécessaire de calculer le débit q_1 en admettant que l'on se trouve dans le cas d'une fouille étroite, puis le débit q_2, cas d'une fouille large, et de retenir la plus faible des deux valeurs.

4 RECOMMANDATIONS

Sauf l'exception des enceintes fichées dans des horizons étanches homogènes, réguliers et bien connus, avec niveau de fiche d'écran qui assure la stabilité statique, tous les projets de rabattement sont critiques en raison des incertitudes sur les perméabilités, des risques d'instabilité et des risques d'entraînements.

Les problèmes de stabilité et de gradient critique qui font l'objet de la fiche 040 « Stabilité des fonds de fouille » doivent être examinés.

Le débit de calcul doit toujours être pondéré par des coefficients partiels qui tiennent compte de la qualité des informations disponibles sur les données et de l'expérience du projeteur dans le domaine des rabattements. Le débit sera donc fourni sous la forme d'une fourchette dont les bornes sont déterminées en appliquant les coefficients de pondération.

Le coefficient Γ_u est appliqué globalement au débit de calcul, les autres coefficients sur le

terme concerné dans le déroulement du calcul.

Tableau 1 - Expérience de l'utilisateur

Expérience	Γ_u
faible	2,00
moyenne	1,60
bonne	1,30
excellente	1,05

Les caractéristiques géométriques, diamètre de fouille, périmètre, rabattement, ne sont pas pondérées.

Tableau 2 - Pondération de la perméabilité horizontale Kh

Qualité des informations	Γ_K
faible	7,00
moyenne	3,50
bonne (essais ponctuels et analyses granulomètriques cohérents)	2,00
excellente (par exemple essai de pompage et analyse granulomètrique cohérents)	1,10

La perméabilité est le paramètre déterminant dans l'estimation du débit, son estimation doit être faite avec la plus grande prudence (voir la fiche 023 « Estimation de la perméabilité ».

Mais le rapport d'anisotropie joue un rôle tout aussi important, et dans ce cas particulier, il dépend de la géométrie du problème.

Pour donner une idée des variations de ce rapport, le tableau suivant donne les valeurs extrêmes de la perméabilité verticale que l'on peut observer dans un aquifère alluvial composé de 3 matériaux,

1. une matrice de perméabilité 10^{-4} m/s ;
2. une proportion de 2 % de couches de limon de perméabilité 10^{-7} m/s,
3. une proportion de 8 % de couches de sables propres de perméabilité 10^{-2} m/s).

Suivant la géométrie,

Tableau 3 - Valeur de K_v en m/s

Cas	Fouille large	Fouille étroite
fiche faible	1.10^{-4}	
grande fiche		5.10^{-6}

soit un rapport de plus de 20 entre les deux cas extrêmes. Comme les sols sont en général stratifiés horizontalement, mis à part quelques exceptions telles les formations dunaires, les cônes de déjection torrentiels, etc., le rapport d'anisotropie est souvent compris entre 5 et 100 suivant la géométrie du problème et la stratigraphie des dépôts.

Tableau 4 - Pondération de Kh/Kv

Qualité des informations	Γ_A
faible	2,00
moyenne	1,65
bonne (micromoulinet ou granulo continus)	1,35
excellente (par exemple essai de pompage localisé en altitude avec mesure ponctuelle des influences aux différents niveaux)	1,10

5 REFERENCES

1. de Cazenove E., Cardinal J.
   Ouvrages profonds à radiers perméables..
   Travaux n° 439, Octobre 1971.
2. Joint Depts of the Army, the Air Forces & the Navy, USA
   Technical Manual TM5-818-5/AFM 88.5

Ce document vise à un but d'information. Ses auteurs et Terrasol déclinent toute responsabilité quant à l'utilisation, adaptation ou interprétation de cette information dans le cadre d'une activité professionnelle.